何晖,郭学良,李宏宇,等. 2011. 人工消除冷雾的个例模拟分析 [J]. 大气科学, 35 (2): 272-286. He Hui, Guo Xueliang, Li Hongyu, et al. 2011. Numerical simulation of the cold fog dissipation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 272-286.

# 人工消除冷雾的个例模拟分析

何晖1,2,3 郭学良4,2 李宏宇1 金华1 刘建忠1

1 北京市人工影响天气办公室,北京 100089
 2 中国科学院大气物理研究所,北京 100029
 3 中国科学院研究生院,北京 100029
 4 中国气象科学研究院,北京 100081

**摘 要**本文在中尺度数值模式 MM5 的 Reisner2 方案中引入了液氮粒子与云相互作用的过程,在中尺度模式 MM5 中实现了催化功能。利用加入催化方案的中尺度模式针对 2007 年 12 月 26 日北京地区的一次冷雾天气过 程进行了消雾的数值模拟研究,探讨了消雾的效果和机理,并针对催化剂的播撒量和播撒位置进行了两组敏感性 试验。结果表明:在此次模拟雾过程中,在目标区上风方 1~2 km 以 5 g/s 的播撒速率播撒 10 min,催化作业开始 9 min 后,目标区开始显现作业效果,最好的效果出现在作业后 24 min,作业效果可以维持 25 min 左右。消雾 机理主要为播撒后人工冰晶通过凝华增长消耗了大量的水汽,导致了水汽通过凝结过程形成雾滴的减少,同时上 游作业导致雾滴向下游目标区平流的减少。本例中,以 15 g/s 的速率播撒作业和在目标区上风方 5~6 km 的地 点作业对能见度的改善最为显著。

关键词 冷雾 消雾 中尺度催化数值模式 机理 催化效果
 文章编号 1006 - 9895 (2011) 02 - 0272 - 15
 中图分类号 P426
 文献标识码 A

### Numerical Simulation of the Cold Fog Dissipation

HE Hui<sup>1, 2, 3</sup>, GUO Xueliang<sup>4, 2</sup>, LI Hongyu<sup>1</sup>, JIN Hua<sup>1</sup>, and LIU Jianzhong<sup>1</sup>

1 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Based on the dynamic frame of mesoscale model MM5 and Reisner2 explicit cloud scheme, a LN (liquid nitrogen) -seeding scheme was developed and used to simulate the cold fog dissipation for the cold fog event on 26 December 2007 in Beijing area. The seeding effect and the physical mechanism were studied. Furthermore, two sensitive experiments were performed to study the seeding effect under different seeding distances and seeding amounts. The results indicate that when the seeding operation lasts 10 min at seeding rate of 5 g/s with distance being about 1-2 km on the upwind side of the target area, the seeding effect in the target area begins to appear at 9 min after seeding operation and the best effect appears at 24 min after seeding operation, the seeding effect can last about 20 min. The microphysical mechanism of the cold fog dissipation is because of the depletion of the water vapor due to the ice sublimation growth induced by seeding, which leads to the decrease of the water vapor condensation into fog droplets, meanwhile the decrease of the fog advection from the upstream region after seeding operation also contribute.

**收稿日期** 2010-05-06, 2010-10-15 收修定稿

资助项目 国家"十一五"科技攻关项目 2006BAC12B04, 公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY200806001-1

作者简介 何晖, 男, 博士研究生, 主要从事云降水物理研究。E-mail: hehui@bjmb.gov.cn

273

utes to the fog dissipation. In this case, seeding operation at seeding rate of 15 g/s with distance being about 5-6 km on the upwind side of the target area can make the target area have the most significant improvement in the visibility.

Key words cold fog, fog dissipation, mesoscale cloud-seeding model, physical mechanism, seeding effect

# 1 引言

大雾是近地层中水汽凝结成水滴或冰晶使水平 能见度小于1 km 的灾害性天气现象。大雾对航 空、地面交通等均有重要的影响,这种影响随着社 会经济的发展呈现日益显著的趋势。同时,雾还加 剧了大气污染,危害人们的身体健康。消除雾害, 净化大气,已引起政府和社会的严重关切。

数值模拟是研究雾的重要手段,关于雾的数值 模拟研究是自 20 世纪 60 年代 Estoque (1963)建 立了大气边界层的数值模式后逐渐开展起来的,国 内外学者利用一维、二维、三维雾模式以及中尺度 模式对雾的生消机制和演变过程、雾的边界层特征 以及地形、气溶胶与雾演变关系等进行了大量的研 究(赵德山和洪钟祥,1981;Turton and Brown, 1987;钱敏伟和雷孝恩,1990;Duynkerke,1991; Bott,1991;孙旭东等,1991;张利民和李子华, 1993;黄建平等,2000;Kong,2002;樊琦等, 2004;Pagowski et al., 2004;Fu G et al., 2006;董 剑希等,2006;史月琴等,2006;何晖等,2009a, 2009b)。

人工消雾是人工影响天气的一个重要组成部分,为了趋利避害,科技工作者从不同角度对不同种类雾的消除方法进行了大量的理论和外场试验研究(胡朝霞,2007)。

在消雾的外场试验方面,世界各地用不同的技术进行消冷暖雾,消雾的效果在短时间、一定范围 内有效,但人工消雾仍然很不完善,在播撒方法和 部位以及催化剂颗粒大小和用量方面很难给出详 细、具体的阐述。在消雾时间、消雾范围等效果方 面不令人满意,也缺乏对消雾的规律性认识(胡朝 霞,2007)

在消雾催化模拟方面,Kornfeld (1970)在一 维的空气团模式里设计了吸湿剂的增长过程,利用 播撒吸湿剂针对不同的雾状况进行了消雾试验,认 为消暖雾必须根据雾滴谱的分布情况选择相应尺度 的吸湿剂。Silverman and Kunkel (1970)利用一维 雾模式考虑了将吸湿性粒子从雾顶播撒后对雾的影 响,得出了有效消雾的吸湿剂的粒子直径为10μm 左右,而播撒量与雾的含水量成正比、与雾滴直径 成反比。赵清云(1989)在二维的雾模式中耦合了 胡志晋等(1983)的吸湿剂在雾中的增长方程进行 了消暖雾的数值试验,结果表明,使用盐粉局部消 除暖雾是完全可能的,较大的盐粉粒子和较大的播 撒量更有利于提高消雾效果。黄培强(1988)在一 维雾模式中研究了盐粉消暖雾的问题,并认为选用 粒径 20~30μm 以 0.54~0.91 g/m<sup>3</sup>的播撒率进 行消雾,效果较好。郭恩铭和张江印(1991)通过 在一维雾模式中改变空气的温度模拟加热对雾的影 响,表明随着温度的升高,雾滴数浓度下降,而雾 滴直径随雾中空气温度的升高而先增大后减小,相 对湿度随着温度的升高而减小。

目前在消雾数值模拟研究方面明显偏少,并且 进行的消雾模拟研究主要是在雾模式中进行的,雾 模式虽然是一种研究雾的很好的工具,但是由于它 主要针对雾设计的,无法考虑地形、环境场的变化 对雾滴的影响。利用雾模式进行消雾模拟对于消雾 技术规律性的分析和研究以及其中的微物理机制的 认识等均存在明显的局限性。

本文通过在中尺度数值模式 MM5 的 Resiner2 方案中引入了液氮 (LN) 与云相互作用的过程 (黄 燕和徐华英, 1994; Guo et al., 2006; 方春刚等, 2009),在中尺度模式 MM5 中实现了催化功能,利 用加入催化方案的中尺度数值模式针对 2007 年 12 月 26 日北京地区的一次冷雾天气过程进行了消雾 的数值模拟研究,结合极轨卫星观测资料,以及在 北京市气象局南郊观象台进行的系留艇探测资料和 探空资料,探讨了其中的消雾机理,并通过两组敏 感性试验就催化剂的播撒量和播撒位置的改变对消 雾效果的影响进行了探讨。

# 2 天气形势

2007 年 12 月 24 日以后,在 500 hPa 天气形势 图上,50°N 以南的中纬度亚洲地区等高线比较平 直,以西南偏西气流为主,短时间为西北偏西气 流。25日后有一小槽自西向东移动,中低层逐渐 为较强的暖脊控制,冷空气活动不明显。27日 20:00(北京时,下同)后有一个明显的槽影响北 京。

26日08时,在1000hPa天气形势图上地面是 高压逐渐变性,转为均压场,北京地区处在高压脊 的南部,冷湿空气从渤海湾回流到北京南部地区; 导致北京出现大雾天气。之后,北京地区后受较强 冷空气影响,雾逐渐消散。

图 4 中的实线是北京气象局南郊观象台观测的 12 月 26 日 19:00~27 日 03:00 时逐时地面能见度 情况,可以看出,雾最强的时刻出现在 26 日 22:00 左右,当时的能见度为 400 m。26 日 22:00 以后能 见度逐渐好转。

# 3 催化过程和模拟试验设计

3.1 催化过程

中尺度模式 MM5 的 Resiner2 方案中包括云水、雨水、云冰、雪、霰等的比含水量预报及冰晶数浓度预报。我们在该方案中加入了液氮的预报方程,

$$\frac{\mathrm{d}X_{\mathrm{s}}}{\mathrm{d}t} = -D_{\mathrm{xs}} + S_1 + S_2, \qquad (1)$$

其中,  $X_s$  表示液氮粒子的比含量,  $D_{xs}$ 表示  $X_s$  的次 网格尺度混合项。 $S_1$  和  $S_2$  表示  $X_s$  的源汇项, 源 汇项如下,

$$S_1 = \frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{LN}}}{\mathrm{d}t},\tag{2}$$

$$S_2 = S_{\rm dv}, \qquad (3)$$

dM<sub>LN</sub>/dt 是液氮的播撒率, S<sub>dv</sub>表示由于液氮的致冷 作用造成液氮的汽化。液氮的沸点为-195.8℃, 膨胀系数为 600,当其由喷管喷出后,液氮迅速蒸 发、汽化,造成液氮滴(粒)周围空气超低温而形 成超饱和,促使水汽同质核化形成冰晶。

液氮的成核率(N<sub>a</sub>)与温度的关系为(王美玲等,1993):

$$N_{\rm a}(\Delta T) = 0, \qquad \Delta T \leqslant 0 \text{ K}, \qquad (4)$$

$$N_{\rm a}(\Delta T) = 10^{12}, \qquad \Delta T > 0 \text{ K},$$
 (5)  
其中,  $\Delta T = T_0 - T, \ T_0 = 273.15 \text{ K}_{\circ}$ 

由于液氮的作用,造成冰晶比质量浓度和数浓 度变化如下:

$$\frac{\partial q_{\rm i}}{\partial t} = -m_{\rm i0} \times S_{\rm dv} \times N_{\rm a}(\Delta T), \qquad (6)$$

$$\frac{\partial N_{\rm i}}{\partial t} = -S_{\rm dv} \times N_{\rm a}(\Delta T), \qquad (7)$$

其中, $m_{10}$ 表示最小的冰晶质量,其值取为  $10^{-12}$  kg (与 Reisner2 方案中一致)。

播撒液氮对温度场的影响主要包括以下三个过程(Guo et al., 2006):

(1) 液氮的汽化造成的温度变化:

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{Q}_{\mathrm{l}}}{\mathrm{d}t} = -L_{\mathrm{IN}} \frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{LN}}}{\mathrm{d}t},\tag{8}$$

其中, L<sub>IN</sub>(=9.96×10<sup>4</sup> J/kg) 是液氮的汽化潜热。

(2) 液氮与周围空气的热传导造成的温度变化:

$$\frac{\mathrm{d}Q_2}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}M_{\mathrm{LN}}}{\mathrm{d}t}c_{\mathrm{V}}(T-T_{\mathrm{s}}), \qquad (9)$$

液氮的表面温度  $T_s$  = − 195.8℃, T 是环境温度,  $c_V$ (=717 J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) 是干空气的等容比热。

(3) 水汽在人工冰核上的凝华造成的温度变化:

$$\frac{\mathrm{d}Q_{3}}{\mathrm{d}t} = L_{\mathrm{s}} \,\frac{\partial q_{\mathrm{i}}}{\partial t},\tag{10}$$

 $L_{s}(=2.384 \times 10^{6} \text{ J/kg})$ 是水汽的凝华潜热。

#### 3.2 模拟试验设计

本文使用 PSU 和 NCAR 的三维非静力平衡中 尺度数值模式 MM5V3,该模式的动力学框架与物 理过程都比较完善,提供了多种参数化方案可供选 择,适合于研究各种不同的天气过程。

本文采用了 Grell 对流参数化方案、Blackadar 边界层方案、Resiner2 微物理显式方案以及 RRTM 辐射计算方案。其中 Blackadar 边界层方案适用于 高分辨率的边界层,比如在最低的 1 km 内就有 5 层,地面层的厚度<100 m。包括 4 种稳定度方式, 并使用分离的时步以确保稳定性。Resiner2 微物理 显式方案是一个比较详细的显式云物理方案,该方 案将水成物分为云水、云冰、雨水、雪和霰,并可 显式预报冰晶数浓度。雪谱的截断值与其比质量有 关,而不是设定为固定值。考虑了 35 个微物理过 程,其中 26 个为相变过程。RRTM 辐射计算方案 包括了云辐射短波方案和 RRTM 长波辐射方案, 该长波方案是一个相当准确和有效的方案。它是一 个快速的辐射传递模式,并使用一个相关的 k 模式 来表述详细的吸收波段的效果。这些吸收波段主要 是针对水汽、二氧化碳和臭氧,并对模式的云和降 水场起作用。

模式采用了四重嵌套,格距分别是 27 km、 9 km、3 km 和 1 km,垂直方向为 23 层,模式顶层 为 100 hPa,模式模拟的中心点设在(40.0°N, 116.3°E)(与进行系留艇探测的南郊观象台非常接 近)。模式输入的初始场为 NCEP 每 6 小时一次的 1°×1°格点资料。模拟开始时间为 2007 年 12 月 25 日 08 时(北京时,下同),共模拟 48 小时;当模拟 到 26 日 20:30 时,在第四个区域启用对 Resiner 微 物理过程的催化方案。

# 4 模拟结果与实况的比较

气象观测对大雾的定义为:悬浮在贴近地面的 大气中的大量细微水滴(或冰晶)的可见集合体, 能见度小于1 km。按照一般定义(Cotton and Anthes, 1993),雾中液态水含量范围为0.05~0.2 g/kg, 但根据各地的地域特点和雾形成条件的不同,雾中 液态水含量的范围也有不同,本文取液态水含量 0.05 g/kg 为雾区下界临界值,但对上临界值不作 限制。

图 1 (见文后彩图) 是模拟的 2007 年 12 月 26 日 10:17 地面层雾中液态水含量的水平分布图及相 应时刻极轨卫星大雾监测图像。通过对比可以看 出,模拟的雾区较实况有所偏大,尤其是在天津的 北部和北京的东南部地区,实况中并没有出现雾, 但模拟中则有雾出现。但总体上说,模拟的雾区分 布与实况是比较一致的。

图 2 是 2007 年 12 月 26 日 20:00 北京气象局 南郊观象台 (54511 站) 探空所观测的与模式模拟 的温度、湿度与风速廓线对比,图 3 是 2007 年 12 月 26 日 23:00 和 27 日 02:00 于北京市气象局南郊 观象台系留艇探测与模式模拟的温度、湿度、风速 的廓线对比,可以看出模式模拟的廓线与实况有较 好的一致性。

雾天气中能见度的计算采用了由 Stoelinga and Warner (1999) 提出的根据不同水成物的比含量计算的消光系数的公式:

$$\chi_{\rm vis} = -\ln(0.02)/\beta, \qquad (11)$$

其中,消光系数 $\beta$ 为云水消光系数( $\beta_{clw}$ )、冰晶消 光系数( $\beta_{ice}$ )、雪晶消光系数( $\beta_{snow}$ )和雨水消光系数( $\beta_{rain}$ )之和。

$$\beta = \beta_{\rm clw} + \beta_{\rm ice} + \beta_{\rm snow} + \beta_{\rm rain}. \qquad (12)$$

各水成物消光系数 ( $\beta$ ,单位: km<sup>-1</sup>) 与其比含量 (C,单位 g/m<sup>3</sup>) 的关系见表 1。

#### 表1 水成物含量与对应消光系数的关系

Table 1Relationships between the hydrometeor mass concen-<br/>tration and the extinction coefficient

水成物	关系式
云水	$\beta_{\rm clw} = 144.7 C^{0.88}$
雨水	$\beta_{\rm rain} = 1.1 C^{0.75}$
冰晶	$\beta_{\rm ice} = 163.9C^{1.0}$
雪晶	$\beta_{\rm snow} = 10.4 C^{0.78}$



图 2 2007 年 12 月 26 日 20:00 北京观象台 (54511 站) 探空观测与模式模拟的 (a) 温度 (单位: ℃)、(b) 湿度、(c) 风速 (单位: m/s) 的 廓线

Fig. 2 The observed and simulated temperature, relative humidity, and wind velocity profiles at Beijing observatory (station number 54511) at 2000 BJT 26 Dec 2007



图 3 2007 年 12 月系留艇探测与模式模拟的 (a, d) 温度 (单位: ℃)、(b, e) 湿度、(c, f) 风速 (单位: m/s) 的廓线: (a-c) 26 日 23:00; (d-f) 27 日 02:00

Fig. 3 The observed and simulated (a, d) temperature, (b, e) humidity, and (c, f) wind velocity profiles at Beijing observatory: (a - c) 2300 BJT 26 Dec 2007; (d - f) 0200 BJT 27 Dec 2007



图 4 2007 年 12 月 26 日 19:00~27 日 03:00 观测和模拟的能 见度演变

Fig. 4 Temporal variation of observed and simulated visibility from 1900 BJT 26 Dec to 0300 BJT 27 Dec 2007

需要指出的是,能见度公式中冰晶的消光系数 是基于冰晶为六角盘状的前提下而计算得出的,在 实际的消雾作业中,播撒液氮形成的冰晶其形状未 必一定是六角盘状,也有可能是柱状等其它情况。 此时冰晶的消光系数将会有所变化。

图 4 中的虚线是在模拟的结果上依据此计算公 式计算的南郊观象台处自 12 月 26 日 19:00 到 27 日 03:00 的能见度演变,从中可以看出,模拟的能 见度较实际能见度更差,但两者的演变趋势基本一 致:19:00 以后能见度迅速减小,模拟的雾最强时 候出现在 21:00 左右,较实况偏早,在 21:00 以后, 能见度逐渐改善,在 27 日 02:00 能见度达到一个 比较好的值。可以看出,MM5 模式对北京地区的 这次冷雾过程模拟得比较成功。

# 5 消雾催化模拟

图 5 是在第四个嵌套区域模拟的 26 日 20:30 叠加在流场上的近地面层雾中的液态水含量分布 图,可以看出,此时的风向为东南风,我们以南郊 (39.93°N,116.28°E)为作业目标区(图 5 中以空 心方块表示),以在紧临目标区上游的三个格点作 为作业播撒区(图5中以实心圆表示),由于此区 域格距为1km,所以作业区距目标区的距离为1~ 2km。首先,通过在三个作业点以5g/s的播撒速



图 5 2007 年 12 月 26 日 20:30 叠加在流场上的近地面层的液态水含量分布(单位:g/kg)

Fig. 5 The simulated LWC in the ground surface layer at 2030 BJT 26 Dec 2007

率持续播撒液氮 10 min 进行消雾催化模拟试验, 在 5 g/s 的播撒速率的情况下,式 (1) 中的  $S_1 = 0.6 \times 10^{-7}$ g·kg<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>。

图 6 是在播撒作业 12 min 后,叠加在流场上 的近地面层的雾中液态水含量与未进行催化作业的 同时刻雾中液态水含量分布、催化作业与未催化作 业的液态水含量差值与冰晶差值分布图。从图 6 可 以看出,在作业开始 12 min 后,在作业点的下风 方,出现了大量的人工冰晶,与出现的人工冰晶区 相对应,催化后雾中的液态水含量较未作业有所减 弱。

图 7 (见文后彩图) 是在播撒作业 24 min 后, 叠加在流场上的近地面层的雾中液态水含量与未进 行催化作业的同时刻雾中液态水含量分布、催化作 业与未催化作业的液态水含量与冰晶差值分布图。 此时,播撒作业形成的冰晶继续向下风向扩散,冰 晶的分布范围较作业后 12 min 明显扩大,而冰晶 的含量已有所减少。主要是由于此过程中冰晶聚并 形成雪晶以及冰晶的沉降等过程,致使冰晶的减



图 6 播撒作业 12 min 后地面层中叠加在流场上的液态水含量分布 (单位:g/kg):(a) 未催化试验;(b) 催化试验;(c) 催化与未催化试验的 液态水含量差值;(d) 催化与未催化试验的冰晶差值

Fig. 6 The simulated LWC for (a) unseeding and (b) seeding operations, the differences of (c) LWC and (d) ice content between seeding and unseeding operations in the ground surface layer at 12 min after seeding operation

少。而此时与出现的人工冰晶区相对应区域中雾中 液态水含量与自然相比,减弱非常明显。

图 8 是作业目标区 (39.93°N, 116.28°E) 的催 化作业与非催化作业近地面层雾中液态水含量、依 据公式 (11) 计算的能见度以及催化试验与未催化 试验的能见度、液水含量、冰晶含量、雪晶含量以 及冰晶数浓度差值随时间的变化曲线。从图 8 可以 看出,随着雾中冰晶和雪晶含量的增多,雾中的液 态水含量逐渐减少,能见度逐渐改善。从液态水含 量变化曲线可以看出,在催化作业 9 min 后,距作 业点 1~2 km 的目标区开始显现作业效果,最好的 效果出现在作业后 21 min,作业效果可以维持 25 min 左右。相对于液态水含量的变化,能见度改 善最显著的时刻出现在第 24 min,这主要是由于能 见度是受液态水、冰晶和雪晶含量综合影响的结 果。在此时刻虽然液态水含量的减弱并没有21 min 时明显,但此时冰晶、雪晶的含量较 21 min 时明显 减少,致使此时刻能见度改善最为显著。另外,从 图 8 也可以看到雪晶含量的增加落后于冰晶含量的 增加,这主要是因为雪晶主要来源于冰晶的聚并



图 8 作业目标区 (39.93°N, 116.28°E)的催化作业与非催化作业近地面层雾中各物理量的变化曲线: (a)液态水含量 (单位:g/kg); (b)能见度 (单位:km); (c)催化作业与非催化作业液态含水量、冰晶质量浓度、雪晶质量浓度 (单位:g/kg)、能见度 (单位:km)、冰晶数浓度 (单位:L<sup>-1</sup>)的差值

Fig. 8 Temporal variation of the physical quantities for seeding and unseeding operations at (39. 93°N, 116. 28 °E); (a) LWC; (b) visibility; (c) differences of LWC, 1 mass content (MC) of ice crystal and snow crystal, visibility, number concentration (NC) of ice crystal between seeding and unseeding operations 过程。

# 6 消雾催化机理

为了探讨此次消雾催化模拟的机理,图9给出 了在目标区消雾效果最好的时刻,即播撒作业后 24 min,催化作业与未催化作业在作业目标区 (39.93°N,116.28°E)的雾滴、冰晶与雪晶含量的 差值廓线以及引起相应水成物变化的主要微物理过 程的差值廓线。

从图 9 可以看出,催化作业引起的雾滴减少, 主要是因为水汽凝结为水滴项 (Pcd)的减少,其次 由于在上游的作业引起雾滴向下游目标区平流 (Ha)的减少,同时冰晶、雪晶与雾滴的淞附过程 (Piw、Psw)也促使了雾滴的减少。作业后冰晶的 增多,主要是冰晶的凝华增长 (Pid),其次是冰晶 的淞附增长 (Piw)过程。作业后雪晶的增多主要 来源于冰晶粒子的聚并(Pii),雪晶的凝华增长(Psd)和由于雪晶的淞附过程增多的雪晶(Pss)对 雪晶的增长也起到了一定的作用。随着雾滴的减少 以及冰晶和雪晶从雾中降落到地面(Fi、Fs),雾中 的能见度随之逐渐改善。

所以,此次消雾的机理可以归纳为;在雾中播 撒液氮后,液氮引起的水汽均质核化导致冰晶的出 现,冰晶通过凝华增长消耗了大量的水汽,导致水 汽通过凝结过程形成雾滴减少,同时由于在上游作 业导致雾滴向下游目标区平流的减少,这两个过程 是此次模拟雾滴减少的主要过程,同时冰晶通过聚 并形成雪晶,冰、雪晶的淞附增长也起到了减少雾 滴的作用。另外,雪晶的凝华增长与液氮引起水汽 的均质核化也消耗了一定的水汽,促使了水汽凝结 成雾滴的减少。随着雾滴的减少以及冰晶和雪晶重 力沉降到地面导致雾中能见度显著改善。



图 9 播撒作业 24 min 时催化作业与未催化作业在作业目标区 (39.93°N, 116.28°E)的 (a) 液态水含量、(b) 冰晶、(c) 雪晶含量的差值 廓线以及主要微物理过程引起 (d) 液态水含量、(e) 冰晶、(f) 雪晶含量变化率的差值廓线

Fig. 9 The differences of (a) liquid water, (b) ice crystal, (c) snow crystal content and the differences of change rate of (d) liquid water, (e) ice crystal, (f) snow crystal content resulting from microphysical processes between seeding and unseeding operations at (39, 93°N, 116, 28°E) at 24 min after seeding operation 以不同的播撒速率作业以及 剂量对消雾效果的影响, 层的雾中液态水含量的分 5 g/s 的基础上分别进行 图)是以不同的播撒速率作 5 g/s 和 20 g/s 的催化模 的地面目的能见度的分布图



## 7.1 不同的播撒剂量

为了研究不同的催化剂量对消雾效果的影响, 敏感性试验1在播撒速率5g/s的基础上分别进行 了以播撒速率为10g/s、15g/s和20g/s的催化模



Fig. 12 Same as Fig. 10, but for the mass content of ice crystal : (a) 5 g/s; (b) 10 g/s; (c) 15 g/s; (d) 20 g/s



图 13 同图 12, 但为冰晶数浓度的分布(单位: L<sup>-1</sup>) Fig. 13 Same as Fig. 12, but for the number concentration of ice crystal

7

拟试验,播撒地点和播撒时间均与控制试验相同。

图 10 (见文后彩图) 是在播撒作业 18 min 后, 以不同的播撒速率作业以及未进行催化作业的地面 层的雾中液态水含量的分布图。图 11 (见文后彩 图) 是以不同的播撒速率作业以及未进行催化作业 的地面层的能见度的分布图。图 12 和图 13 分别是 以不同的播撒速率作业后地面层的冰晶质量浓度和 数浓度的分布图。从图 10 可以看出,在作业点的 下风方,从雾中的液态水含量来说,播撒作业较未 进行催化作业的雾中液态水含量明显减弱,而在催 化作业中,播撒速率越大,液水含量减弱则更显 著。从图 11 可见, 在作业点下风方, 播撒作业较 未催化作业雾中的能见度分布明显改善,但与液态 水含量分布情况不同的是, 能见度的改善并非是随 着播撒速率的加大而愈发显著,但当播撒率超过15 g/s后,能见度的改善情况相反会有所降低。从图 12 和图 13 可见, 随着播撒速率的加大, 在播撒区 下风方形成的人工冰晶质量浓度和数浓度越大。人 工冰晶分布的区域和液态水含量减少区域以及能见 度的改善区域基本一致。

2期

图 14 是作业目标区 (39.93°N, 116.28°E) 和 的催化作业与非催化作业依据公式(11)计算的能 见度变化曲线。从图 14 可以看出,催化作业较非 催化作业的能见度显著改善,不同的播撒剂量对能 见度的改善的趋势基本一致。最好的效果出现在作 业后 24 min, 作业效果可以维持 25 min 左右。对 于改善的程度来说, 当播撒速率没有超过 15 g/s 时,播撒速率越大,能见度改善的效果越显著;当 播撒速率超过15g/s时,随着播撒速率的加大,能 见度反而会有所下降。

表 2 是分别以 15 g/s 和 20 g/s 的播撒速率播 撒作业 24 min 时不同水成物的消光系数以及总的 消光系数。从表2可以看出,与15g/s的播撒速率 相比,虽然 20 g/s 的播撒速率造成的云水消光系数 小于15 g/s的播撒速率,但冰晶和雪晶的消光系数 却明显高于15g/s的播撒速率,导致总的消光系数 较15g/s的更高,能见度反而降低。

表 2 两种播撒速率播撒作业 24 min 时不同水成物的消光 系数

Table 2	The extinction	coefficient	of hydrometeors	at 24	min
after seed	ling operation a	nt two differ	ent seeding rate		

	播撒速率		
消光系数 $/km^{-1}$	15 g/s	20 g/s	
$\beta_{ m clw}$	1.260	0.250	
$eta_{ m ice}$	8.957	13.839	
$\beta_{ m snow}$	1.077	1.097	
$eta_{ m rain}$	0	0	
$_{eta_{ m clw}+eta_{ m ice}+eta_{ m snow}+eta_{ m rain}}$	11.294	15.186	



图 14 作业目标区 (39.93°N, 116.28°E) 的催化作业与非催 化作业的能见度变化曲线

Fig. 14 Temporal variation of the simulated visibility for unseeding operation and seeding operation at different seeding rate at (39.93°N, 116.28 °E)

#### 7.2 不同的播撒位置

为了研究不同的催化距离对消雾效果的影响, 敏感性试验2在距目标区1~2km的基础之上,分 别进行了距目标区 3~4 km、5~6 km 和 7~8 km 的播撒催化试验,播撒时间和播撒量与控制试验相 同,播撒位置示意图见图5。

图 15 是在不同的播撒距离下, 作业目标区的 能见度、液态水含量、冰晶含量随时间的演变。从 图 15 可以看出,随着作业距离的加大,目标区形 成的冰晶会变少,这主要是因为当作业点离目标区 的距离比较远时,在上游形成的冰晶也会在较长的 平流传输过程中因与雾滴的淞附等过程增长而逐渐 降落到地面,导致最后到达目标区的冰晶量的减 少。

从液态水含量的减小程度来说,当作业点在距 离目标区 3~4 km 之内时, 距离越大, 在目标区减 少的液态水含量也越多,能见度改善的也会越显 著。当距离超过 3~4 km 后, 随着作业距离的加 大,相应的在目标区减少的液态水含量也越少。为 什么距离目标区 3~4 km 进行催化作业, 液态水含 量的减少最多?图 16a 是在作业后 24 min,催化作 业距离 1~2 km 与 3~4 km 引起目标区液态水含 量变化主要微物理过程的差值廓线,可以看出虽然



图 15 不同的播撒距离下作业目标区的能见度(a)、液态水含量(b)、冰晶含量(c)随时间的演变 Fig. 15 Temporal variation of the simulated (a) visibility, (b) liquid water content, and (c) ice content with different seeding distances from (39.93°N, 116.28°E)



图 16 播撒作业 24 min 时不同的催化作业距离下主要微物理过程引起作业目标区 (39.93°N, 116.28°E) 液态水含量变化率的差值廓线 (单位:g·kg<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>): (a) 作业距离 1~2 km 与 3~4 km的差值; (b) 作业距离 3~4 km 与 5~6 km 的差值

Fig. 16 The differences of LWC change rate resulting from microphysical processes between different seeding distances from (39, 93°N, 116, 28 °E) at 24 min after seeding operation: (a) Between seeding distances 1-2 km and 3-4 km; (b) between seeding distances 3-4 km and 5-6 km

由于距离为 3~4 km 情况下在目标区形成的冰晶 有所减少,致使冰晶凝华消耗的水汽减少,从而水 汽凝结形成的雾滴会较作业距离为 1~2 km 情况 下增多 (Pcd),但是在 3~4 km 距离下作业引起的 雾滴向目标区的平流小于距离为 1~2 km 情况 (Ha),并且其减少的效果大于水汽凝结增多的效 果,所以总的效果 (Tot)是液态水含量在目标区减 少。对于距离为 5~6 km 与 3~4 km 的比较,情况 正好相反 (图 16b),其水汽凝结形成雾滴增多的效 果 (Pcd)大于雾滴自上游平流减少的效果 (Ha), 所以总的效果 (Tot)是作业距离 5~6 km 较 3~ 4 km 在目标区形成的雾滴会增多。

从能见度改善状况来说,距离目标区 5~6 km 的地点进行播撒作业效果最好。虽然在这个情况 下,雾中液水含量的减少没有在距目标 3~4 km 的 作业点作业的情况下显著,但其在目标区形成的冰 晶却相对较少,此时其综合的消光系数最低。

需要指出的是,以上结论针对的是此次雾模拟 个例中5g/s的液氮播撒速率。当液氮播撒速率超 过5g/s时,其最佳的播撒距离应该更远。因为更 多的人工冰晶在上游将消耗更多的雾滴,因此在上 游作业引起雾滴向目标区平流(Ha)减少的效果将 更显著。同时,最佳的播撒距离还同风速有关,风 速越大,冰晶将更容易达到更远的区域,所以相应 的最佳播撒距离也应该更远。

### 8 结论

本文利用 NCEP 再分析资料和加入催化方案 的中尺度 MM5 模式,对 2007 年 12 月 26 日北京地 区的一次冷雾天气过程在模拟成功的基础上进行了 消雾模拟研究,研究了其中的消雾机理,并通过两 组敏感性试验就催化剂的播撒量和播撒位置的改变 对消雾效果的影响进行了探讨,主要得出以下结 论:

(1) 在此次模拟雾过程中,在目标区上风方 1~2 km 处以5 g/s 的播撒速率播撒 10 min,目标 区在作业开始 9 min 后显现作业效果,最好的效果 出现在作业后 24 min,作业效果可以维持 25 min 左右。

(2)对催化作业后消雾的微物理机制分析可以 发现,在雾中播撒液氮后,液氮引起的水汽均质核 化导致冰晶的出现,冰晶通过凝华增长消耗了大量 的水汽,因为水汽的大量消耗,导致了水汽凝结成 雾滴减少,同时,由于在上游作业导致雾滴自上游 向目标区平流的减少,这两个过程是此次模拟雾滴 减少的主要过程。随着雾滴的减少以及冰晶、雪晶 从雾中降落到地面,雾中能见度随之改善。

(3) 在此次模拟的雾个例中,当在目标区上风 方 1~2 km 处播撒时,以 15 g/s 的速率播撒作业 对目标区能见度的改善最为显著。

(4) 从不同的播撒距离对消雾效果的分析中可 以看出,以5g/s播撒速率的情况下,在目标区上 风方5~6km的地点作业对目标区能见度的改善 最为显著。在不同的播撒速率和不同风速下最佳播 撒距离会有所不同。在未来的研究中需要针对更多 的雾个例进行大量的催化模拟试验,分析统计结 果,以得出更普遍的结论。

#### 参考文献 (References)

- Bott A. 1991. On the influence of the physico-chemical properties of aerosols on the life cycle of radiation fogs [J]. Boundary Layer Meteorology, 56:1-31.
- Cotton W R, Anthes R A. 1993. 风暴动力学 [M]. 叶家东, 范蓓芬, 程麒生, 译. 北京: 气象出版社, 331-342. Cotton W R,

Anthes R A. 1989. Storm and Cloud Dynamic [M]. Academic Press, 311-320.

- 董剑希, 雷恒池, 胡朝霞, 等. 2006. 北京及其周边地区一次大雾的 数值模拟及诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (2): 175 – 184. Dong Jianxi, Lei Hengchi, Hu Zhaoxia, et al. 2006. Numercial simulation and diagnosis of a dense fog in Beijing and its penumbra [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (2): 175 – 184.
- Duynkerke P G. 1991. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observations [J]. Mon. Wea. Rev., 119: 324-341.
- Estoque M A. 1963. A numerical model of the atmospheric boundary layer [J]. J. Geophys. Res., 68: 1103-1113.
- 方春刚,郭学良,王盘兴. 2009. 碘化银播撒对云和降水影响的中 尺度数值模拟研究 [J]. 大气科学,33 (3):621-633. Fang Chungang, Guo Xueliang, Wang Panxing. 2009. The physical and precipitation response to AgI seeding from a mesoscale WRFbased seeding model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 621-633.
- 樊琦,王安宇,范绍佳,等. 2004. 珠江三角洲地区一次辐射雾的数 值模拟研究 [J]. 气象科学,24(6):821-834. Fan Qi, Wang Anyu, Fan Shaojia, et al. 2004. Numerical simulation study of a radiation fog in Pearl River Delta regions [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 24(6):821-834.
- Fu G, Guo J, Xie S P, et al. 2006. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea [J]. Atmospheric Research, 81: 293-303.
- 郭恩铭,张江印. 1991. 热力影响雾滴蒸发的数值模拟 [J]. 空军气象学院学报,12 (3):11-16. Guo Enming, Zhang Jiangyin.
  1991. Numerical simulation of the fog evaporation by the warm effect [J]. Journal of the Air Force Institute of Meteorology (in Chinese), 12 (3): 11-16.
- Guo X L, Zheng G G, Jin D Z. 2006. A numerical comparison study of cloud seeding by silver iodide and liquid carbon dioxide [J]. Atmos. Res., 79: 186–226.
- 何晖,郭学良,刘建忠,等. 2009a. 北京一次大雾天气边界层结构 特征及生消机理观测与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1174 - 1186. He Hui, Guo Xueliang, Liu Jianzhong, et al. 2009. Observation and simulation study of the boundary layer structure and the formation, dispersal mechanism of a heavy fog event in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1174-1186.
- 何晖,金华,刘建忠,等. 2009b. 北京地区一次辐射雾的数值模拟 [J]. 气候与环境研究,14 (4): 390-398. He Hui, Jin Hua, Liu Jianzhong, et al. 2009b. Simulation and analysis of a radiation fog event in Beijing area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (4): 390-398.
- 胡朝霞. 2007. 降水性层状云系与雾的观测和数值模拟研究[D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 60pp. Hu Zhaoxia. Observational analysis and numerical simulation of precipitation

stratiform cloud and fog [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 60pp.

- 胡志晋, 严采蘩, 王玉彬. 1983. 层状暖云降雨及其催化的数值模 拟 [J]. 气象学报, 41 (1): 79 - 88. Hu Zhijin, Yan Caifan, Wang Yubin. 1983. Numerical simulation of rain and seeding progress in warm layer clouds [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 41 (1): 79-88.
- 黄建平,李子华,黄玉仁,等. 2000. 西双版纳地区雾的数值模拟研究 [J]. 大气科学,24 (6):821-834. Huang Jianping, Li Zihua, Huang Yuren, et al. 2000. A three-dimensional model study of complex terrain fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (6):821-834.
- 黄培强. 1988. 盐粉人工消暖雾的数值试验 [J]. 空军气象学院学 报,9(1):33-40. Huang Peiqiang. 1988. Numerical simulation of the fog dissipation by salt-seeding [J]. Journal of the Air Force Institute of Meteorology (in Chinese), 9(1):33-40.
- 黄燕,徐华英. 1994. 播撒碘化银粒子进行人工防雹的数值试验 [J]. 大气科学,18 (5): 612-622. Huang Yan, Xu Huaying. 1994. Numerical experiments on hail suppression by AgI seeding [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 18 (5): 612-622.
- Kornfeld P. 1970. Some numerical experiments for warm fog clearing by seeding with hygroscopic nuclei [J]. Journal of Applied Meteorology, 9: 459-463.
- Kong F. 2002. An experimental simulation of a coastal fog-stratus case using COAMPS (tm) model [J]. Atmospheric Research, 64: 205-215.
- Pagowski M, Gultepe I, King P. 2004. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario [J]. Journal of Applied Meteorology, 43: 3-16.
- 钱敏伟, 雷孝恩. 1990. 长江上空辐射雾的数值研究 [J]. 大气科 学, 14 (4): 483 - 489. Qian Minwei, Lei Xiaoen. 1990. Numerical study of radiation fog over the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 14 (4): 483-489.
- 史月琴,邓雪娇,胡志晋,等. 2006. 一次山地浓雾的三维数值研究 [J]. 热带气象学报,22(4):351-359. Shi Yueqin, Deng Xue-

jiao, Hu Zhijin, et al. 2006. Three-dimensional numerical study on dense fog over mountain area [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (4): 351-359.

- Silverman B A, Kunkel B A. 1970. A numerical model of warm fog dissipation by hygroscopic particle seeding [J]. Journal of Applied Meteorology, 9: 627-633.
- Stoelinga M T, Warner T T. 1999. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event [J]. Journal of Applied Meteorology, 38: 385-404.
- Turton J D, Brown R. 1987. A comparison of a numerical model of radiation fog with detailed observations [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 113 (475): 37-54.
- 王美玲,任婕,韩光,等. 1993. 液氮成冰效率的小云室试验 [J].
  气象,19(5):20-22. Wang Meiling, Ren Jie, Han Guang, et al. 1993. Test on the ice nucleation of liquid nitrogen in a small cloud chamber [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 19 (5): 20-22.
- 孙旭东,徐华英,李桂忱,等. 1991. 二维平流辐射雾的数值模拟 [J]. 大气科学,15(6):99-109. Sun Xudong, Xu Huaying, Li Guichen, et al. 1991. Two-dimension numerical model of advection-radiation fogs [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 15(6):99-109.
- 张利民,李子华. 1993. 重庆雾的二维非定常数值模拟 [J]. 大气科 学, 17 (6): 750 - 755. Zhan Limin, Li Zihua. 1993. A two-dimensional time-integral numerical model of Chongqing fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 17 (6): 750 - 755.
- 赵德山,洪钟祥. 1981. 典型福射逆温生消过程的爆发性特征 [J]. 大气科学,5(4):407-415. Zhao Deshan, Hong Zhongxiang. 1981. Some burst characteristics during the process of occurring and dissipating of typical radiation inversion [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 5(4):407-415.
- 赵清云. 1989. 播撒盐粉局部消除暖雾的数值模拟 [J]. 热带气象, 5(3):245-252. Zhao Qingyun. 1989. Numerical simulation of warm fog dissipation by salt-seeding [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 5(3):245-252.



图 1 2007 年 12 月 26 日极轨卫星大雾监测图像(a)和模拟的地面层雾中液态水含量分布图(b)

Fig. 1 (a) The polar orbit meteorological satellite fog image and (b) the simulated liquid water content (LWC) distribution at the ground level at 1017 BJT (Beijing time) 26 Dec 2007





35 卷



图 10 播撒作业 18 min, 以不同的播撒速率作业以及未进行催化作业的地面层的液态水含量的分布 (单位:g/kg): (a) 未催化; (b) 5 g/ s; (c) 10 g/s; (d) 15 g/s; (e) 20 g/s

Fig. 10 The simulated LWC for unseeding operation and seeding operation at different seeding rate in the ground surface layer at 18 min after seeding operation: (a) Unseeding; (b) 5 g/s; (c) 10 g/s; (d) 15 g/s; (e) 20 g/s



- 图 11 同图 10, 但为能见度的分布
- Fig. 11 Same as Fig. 10, but for the visibility

(a)